

Desain Sistem Kontrol Menggunakan *Fuzzy Gain Scheduling* Untuk Unit *Boiler-Turbine Nonlinear*

Dariska Kukuh Wahyudianto, Trihastuti Agustinah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: trihastuti@elect-eng.its.ac.id

Abstrak— *Boiler-turbine* adalah suatu pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dalam skala kecil. Pada makalah ini membahas tentang permasalahan pengaturan tekanan drum dan daya output pada *boiler-turbine plant*. Sedangkan variabel perbedaan level air pada drum dijaga tetap konstan. Kontroler *fuzzy gain scheduling* didesain untuk mengatasi permasalahan tersebut. Model nonlinear *boiler-turbine plant* direpresentasikan ke dalam model fuzzy Takagi-Sugeno melalui beberapa titik kerja. Kontroler *state feedback* disusun dengan konsep *Parallel Distributed Compensation* (PDC). *Gain* kontroler diperoleh melalui metode *pole placement*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon tekanan drum dan daya output mampu mengikuti sinyal referensi yang diberikan.

Kata Kunci— *Boiler-Turbine Plant, Fuzzy Gain Scheduling, Model Fuzzy Takagi Sugeno, Parallel, Distributed Compensation.*

I. PENDAHULUAN

Boiler-turbine adalah suatu pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dalam skala kecil, yang merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik dengan mengkonversikan energi kimia yang berbahan bakar seperti batu bara, minyak bumi ataupun gas bumi menjadi energi mekanik, dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan poros sudut-sudut *turbine*. Tujuan *boiler-turbine* adalah menghasilkan uap yang berasal dari air sungai atau laut yang diproses *demineralized water* terlebih dahulu untuk dipanaskan ke dalam *boiler* sehingga menjadi uap jenuh.

Untuk menggerakkan *turbine* diperlukan uap panas lanjut (uap kering) agar tidak merusak *turbine*. Alat yang dapat mengubah uap basah menjadi uap kering disebut *superheater*. Uap yang keluar dari *superheater* mempunyai tekanan yang sama dengan keluaran *boiler*, dan mempunyai temperatur lebih tinggi dari *boiler*.

Pemodelan *boiler-turbine plant* termasuk kategori sistem nonlinear yang memiliki banyak ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut dapat berupa gangguan eksternal, ketidakpastian model, variasi parameter, ataupun *error* yang muncul pada saat linearisasi. Ketidakpastian-ketidakpastian ini dapat mempengaruhi kestabilan sistem jika tidak diantisipasi oleh sistem kontrol. Selain itu, pemodelan *boiler-turbine plant* menggunakan konfigurasi sistem *Multi Input Multi Output* [1].

Permasalahan yang terjadi pada *boiler-turbine plant* adalah dengan terdapat ketidakpastian dan pemodelan *boiler-turbine plant* menggunakan konfigurasi sistem *Multi Input Multi Output*. Sehingga variabel yang diatur pada *boiler-*

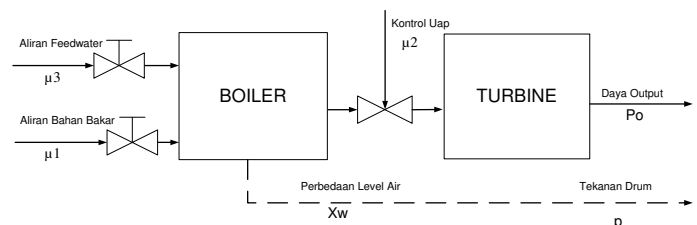
turbine plant mengalami kesulitan mengikuti sinyal referensi berupa beberapa kondisi titik kerja yang diinginkan [2].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pada makalah ini dibuat desain sistem kontrol menggunakan *fuzzy gain scheduling* dan visualisasi proses *boiler-turbine plant*. Simulasi *plant* dibuat dengan menggunakan *software* MATLAB versi 7.10.0.499 (R2010a). Sedangkan pembuatan visualisasi *plant* dibuat menggunakan *software* Visual Basic 6. Di dalam *software* ini dibuat visualisasi *plant* yang seolah-olah menggambarkan proses yang terjadi pada *boiler-turbine plant*.

II. TEORI DASAR

Model *boiler-turbine* yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini merupakan sistem nonlinear berbentuk tiga *state* yang telah dikembangkan dan diteliti oleh Bell dan Astrom pada tahun 1987. Model ini berdasarkan hukum dasar konservasi yang mengatur pengoperasian *boiler-turbine* saat mempertahankan penekanan pada struktur yang lebih sederhana dan merupakan perluasan model nonlinear berbentuk dua *state* yang merepresentasikan tekanan drum dan dinamika daya. Penyertaan persamaan penguapan ekstra dan dinamika fluida dapat menyampaikan gambaran tentang dinamika level drum air. Diagram skematik *boiler-turbine* dinamik ditunjukkan pada Gambar 1.

Parameter perhitungan yang digunakan pada *boiler-turbine plant* ini berasal dari data dinamis yang diukur dari *plant* pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berada di Sydvenska Kraft AB daerah dekat Malmo, Swedia. PLTU ini berbahan bakar minyak bumi dan dapat menghasilkan daya output maksimal sebesar 160 MW. Meskipun model *boiler-turbine* ini termasuk sistem orde rendah, model ini mampu menangkap dinamika perilaku utama yang sesuai dengan *real plant*.



Gambar. 1. Diagram Skematik *Boiler-Turbine* Dinamik

Sistem dinamik *boiler-turbine* memiliki tiga elemen vektor *state* yang dinyatakan dalam x . Ketiga elemen vektor *state* tersebut adalah:

x_1 adalah tekanan drum (Kg/cm²),

x_2 adalah daya output (MW),

x_3 adalah masa jenis fluida (Kg/m³)

Model matematika dalam bentuk persamaan *state* dapat dituliskan sebagai berikut [3]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -0,0018u_2x_1\% + 0,9u_1 - 0,15u_3 \\ \dot{x}_2 &= (0,073u_2 - 0,016)x_1\% - 0,1x_2 \\ \dot{x}_3 &= (141u_3 - (1,1u_2 - 0,19)x_1) / 85 \\ y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0,05(0,23073x_3 + 100\alpha_{cs} + q_e / 9 - 67,975)\end{aligned}\quad (1)$$

dengan:

$$\begin{aligned}\alpha_{cs} &= \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)} \\ q_e &= (0,854u_2 - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096\end{aligned}$$

Sistem nonlinear dapat diilustrasikan dalam model *fuzzy* Takagi-Sugeno yang memiliki aturan model *plant* yang dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut [4].

Aturan *plant* ke- i :

$$\begin{aligned}\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ AND } \dots \text{ AND } z_j(t) \text{ is } M_{ij} \\ \text{Then } \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) &= C_i x(t) + D_i u(t) \\ i &= 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p\end{aligned}\quad (2)$$

dengan r sebagai jumlah aturan *fuzzy*, dan p adalah jumlah himpunan *fuzzy* dalam satu aturan, dan M sebagai himpunan *fuzzy*, dengan vektor *state* $x(t) \in R^n$, vektor kontrol masukan $u(t) \in R^m$, dan vektor keluaran sistem $y(t) \in R^q$, sedangkan $z(t) \in R^l$ merupakan variabel pada bagian premis.

Model *fuzzy* T-S secara keseluruhan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (3)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [C_i x(t) + D_i u(t)] \quad (4)$$

dengan

$$w_i(z_j(t)) = \frac{\mu_i(z_j(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z_j(t))} \quad (5)$$

$$\mu_i(z_j(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)) \quad (6)$$

Pembobot $w_i(z(t))$ dan derajat keanggotaan $\mu_i(z(t))$ memiliki sifat sebagai berikut [5]:

$$w_i(z(t)) \geq 0 ; \sum_{i=1}^r w_i(z_j(t)) = 1 \quad (7)$$

$$\mu_i(z(t)) \geq 0 ; \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) > 0 \quad (8)$$

Kontroler *state feedback* dapat disusun dengan konsep *Parallel Distributed Compensation* (PDC). Dalam konsep PDC, tiap aturan kontroler dirancang berdasarkan aturan model *plant* linear yang bersesuaian dengan himpunan *fuzzy* yang sama. Untuk setiap aturan, dapat digunakan teknik desain kontrol linear.

Dari aturan *plant* yang ada, dapat disusun aturan kontroler *fuzzy* dengan konsep PDC sebagai berikut.

Aturan kontroler ke- i :

$$\begin{aligned}\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ AND } \dots \text{ AND } z_j(t) \text{ is } M_{ij} \\ \text{Then } u(t) &= -K_i x(t) \\ i &= 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p\end{aligned}\quad (9)$$

Secara keseluruhan, keluaran dari kontroler *fuzzy* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [-K_i x(t)] \quad (10)$$

Maka, model *fuzzy* T-S dapat dituliskan menjadi sistem lup tertutup sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^p w_i(z(t)) w_j(z(t)) [(A_i - B_i K_j) x(t)] \quad (11)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^p w_i(z(t)) w_j(z(t)) [(C_i - D_i K_j) x(t)] \quad (12)$$

Dengan mengacu pada Persamaan (5) dan (6), maka model (8) dan (9) dapat disederhanakan menjadi:

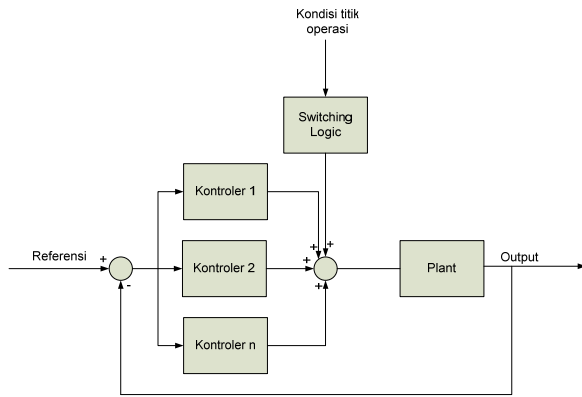
$$\dot{x}(t) = (A_i - B_i K_j) x(t) \quad (13)$$

$$y(t) = (C_i - D_i K_j) x(t) \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p$$

Sistem kontroler *gain scheduling* bisa dianggap sebuah kontroler yang parameternya dapat diperbaharui secara *online* dengan nilai yang dapat berubah sesuai dengan kondisi titik kerjanya. Kelebihan *gain scheduling* terletak pada perubahan cepat parameter pengendali dalam merespon perubahan proses. Pola konvensional *gain scheduling* adalah mengembangkan model proses yang terlinearisasi pada beberapa titik kerja dan merancang pengendali linearnya [5].

Metode tersebut menggunakan pendekatan model *driven*. Logika *fuzzy* dapat diaplikasikan pada *gain scheduling* dalam beberapa cara. Salah satunya adalah aplikasi logika *fuzzy* sebagai *gain scheduler* dalam *fuzzy computing* dan yang membedakannya dengan *fuzzy controller* adalah disini logika *fuzzy* sebagai *gain scheduler* tidak berperan langsung sebagai pengendali. Skema kontroler *gain scheduling* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar. 2. Skema Kontroler Gain Scheduling

III. PERANCANGAN SISTEM

Model sistem disusun atas model *boiler-turbine plant*. Model *plant* yang digunakan adalah model matematika nonlinear *boiler-turbine plant* pada Persamaan (1) yang dilinearisasi pada beberapa titik kerja.

Untuk titik kerja pertama:

$\mathbf{x}^* = [75,6 \ 25,01 \ 299,6]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,156 \ 0,483 \ 0,183]^T$ diperoleh:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0,0017 & 0 & 0 \\ 0,0372 & -0,1 & 0 \\ -0,0040 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,2337 & -0,15 \\ 0 & 9,4768 & 0 \\ 0 & -0,9784 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_1\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0095 & 0 & 0,0045 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,3587 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Untuk titik kerja kedua:

$\mathbf{x}^* = [86,4 \ 36,65 \ 342,4]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,209 \ 0,552 \ 0,256]^T$ diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{B}_2\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -0,002 & 0 & 0 \\ 0,0477 & -0,1 & 0 \\ -0,0049 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,2716 & -0,15 \\ 0 & 11,0129 & 0 \\ 0 & -1,1181 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + \mathbf{D}_2\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0082 & 0 & 0,0045 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,4099 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Untuk titik kerja ketiga:

$\mathbf{x}^* = [97,2 \ 50,52 \ 385,2]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,271 \ 0,621 \ 0,34]^T$ diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_3\mathbf{x} + \mathbf{B}_3\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0,0022 & 0 & 0 \\ 0,0585 & -0,1 & 0 \\ -0,0058 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,31 & -0,15 \\ 0 & 12,5732 & 0 \\ 0 & -1,2579 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_3\mathbf{x} + \mathbf{D}_3\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0071 & 0 & 0,0046 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,4612 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Untuk titik kerja keempat:

$\mathbf{x}^* = [108 \ 66,65 \ 428]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,34 \ 0,69 \ 0,433]^T$

diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_4\mathbf{x} + \mathbf{B}_4\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} -0,0025 & 0 & 0 \\ 0,0694 & -0,1 & 0 \\ -0,0067 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_4 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,349 & -0,15 \\ 0 & 14,1555 & 0 \\ 0 & -1,3976 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_4\mathbf{x} + \mathbf{D}_4\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{C}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0063 & 0 & 0,0047 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,5124 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Untuk titik kerja kelima:

$\mathbf{x}^* = [118,8 \ 85,06 \ 470,8]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,418 \ 0,759 \ 0,543]^T$ diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_5\mathbf{x} + \mathbf{B}_5\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} -0,0028 & 0 & 0 \\ 0,0806 & -0,1 & 0 \\ -0,0076 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_5 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,3885 & -0,15 \\ 0 & 15,7576 & 0 \\ 0 & -1,5374 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_5\mathbf{x} + \mathbf{D}_5\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{C}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0057 & 0 & 0,0048 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,5636 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Untuk titik kerja keenam:

$\mathbf{x}^* = [129,6 \ 105,8 \ 513,6]^T$; $\mathbf{u}^* = [0,505 \ 0,828 \ 0,663]^T$ diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_6\mathbf{x} + \mathbf{B}_6\mathbf{u}$$

dengan

$$\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} -0,0031 & 0 & 0 \\ 0,0918 & -0,1 & 0 \\ -0,0085 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_6 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,4285 & -0,15 \\ 0 & 17,3781 & 0 \\ 0 & -1,6772 & 1,6588 \end{bmatrix}$$

dan

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_6\mathbf{x} + \mathbf{D}_6\mathbf{u} \quad (15)$$

dengan

$$\mathbf{C}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,0052 & 0 & 0,0049 \end{bmatrix}; \mathbf{D}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2533 & 0,6149 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Persamaan (15) merupakan model linear dari *boiler-turbine plant* yang terdiri dari enam titik kerja.

Setelah model *state space* dari masing-masing titik kerja dari *boiler-turbine plant* yang akan dilinearisasi telah diperoleh, kita dapat menentukan *feedback gain K*-nya untuk masing-masing model *state space* dengan menggunakan metode *pole placement*. Nilai *pole-pole* yang diinginkan yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p_1 &= [-0,8436 \quad -9,37 \quad -1] \\ p_2 &= [-0,7866 \quad -10,82 \quad -2] \\ p_3 &= [-0,7411 \quad -12,41 \quad -2,2] \\ p_4 &= [-0,6871 \quad -13,989 \quad -2,3] \\ p_5 &= [-0,6246 \quad -15,608 \quad -2,4] \\ p_6 &= [-0,55315 \quad -17,199 \quad -2,5] \end{aligned} \quad (16)$$

Sehingga diperoleh nilai **K** dari masing-masing model *state space*-nya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \begin{bmatrix} 0,9365 & 0,3501 & 0,1005 \\ 0,0039 & 0,9782 & 0,0000 \\ -0,0001 & 0,5769 & 0,6028 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_2 &= \begin{bmatrix} 0,8731 & 0,4031 & 0,2009 \\ 0,0043 & 0,9734 & 0,0000 \\ -0,0000 & 0,6561 & 1,2057 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_3 &= \begin{bmatrix} 0,8226 & 0,4610 & 0,2210 \\ 0,0047 & 0,9791 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,7424 & 1,3262 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_4 &= \begin{bmatrix} 0,7626 & 0,5183 & 0,2311 \\ 0,0049 & 0,9812 & -0,000 \\ 0,0001 & 0,8267 & 1,3865 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_5 &= \begin{bmatrix} 0,6931 & 0,5769 & 0,2411 \\ 0,0051 & 0,9842 & -0,0000 \\ 0,0002 & 0,9121 & 1,4468 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_6 &= \begin{bmatrix} 0,6137 & 0,6343 & 0,2512 \\ 0,0053 & 0,9839 & -0,0000 \\ 0,0002 & 0,9948 & 1,5071 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Dari hasil linearisasi *boiler-turbine plant*, dapat disusun model *fuzzy T-S*. Dengan melinearisasikan pada enam titik kerja dari *boiler-turbine plant*, maka model *fuzzy T-S* yang digunakan memiliki enam aturan dengan satu variabel premis, yaitu tekanan drum.

Dengan menggunakan model linear pada persamaan (15), maka model *fuzzy T-S* dibentuk dengan aturan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-1:} \\ \text{If } x_1 = M_1 \text{ (sekitar } 75,6 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_1 x + \mathbf{B}_1 u \\ y = \mathbf{C}_1 x + \mathbf{D}_1 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-2:} \\ \text{If } x_1 = M_2 \text{ (sekitar } 86,4 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_2 x + \mathbf{B}_2 u \\ y = \mathbf{C}_2 x + \mathbf{D}_2 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-3:} \\ \text{If } x_1 = M_3 \text{ (sekitar } 97,2 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_3 x + \mathbf{B}_3 u \\ y = \mathbf{C}_3 x + \mathbf{D}_3 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-4:} \\ \text{If } x_1 = M_4 \text{ (sekitar } 108 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_4 x + \mathbf{B}_4 u \\ y = \mathbf{C}_4 x + \mathbf{D}_4 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-5:} \\ \text{If } x_1 = M_5 \text{ (sekitar } 118,8 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_5 x + \mathbf{B}_5 u \\ y = \mathbf{C}_5 x + \mathbf{D}_5 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan plant ke-6:} \\ \text{If } x_1 = M_6 \text{ (sekitar } 129,6 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } \dot{x} = \mathbf{A}_6 x + \mathbf{B}_6 u \\ y = \mathbf{C}_6 x + \mathbf{D}_6 u \end{aligned} \quad (18)$$

Dengan menggunakan konsep PDC, dapat disusun aturan kontroler *fuzzy* yang bersesuaian dengan aturan *plant* menjadi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-1:} \\ \text{If } x_1 = M_1 \text{ (sekitar } 75,6 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_1 x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-2:} \\ \text{If } x_1 = M_2 \text{ (sekitar } 86,4 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_2 x \end{aligned}$$

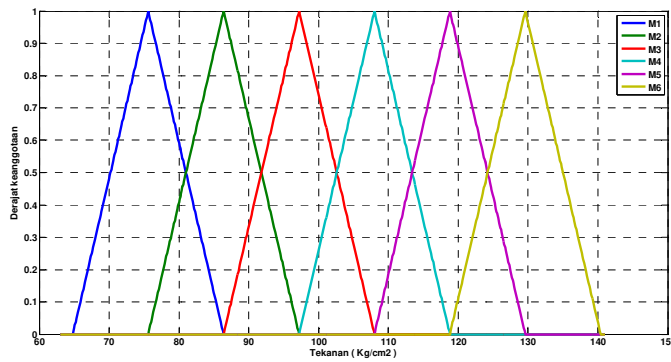
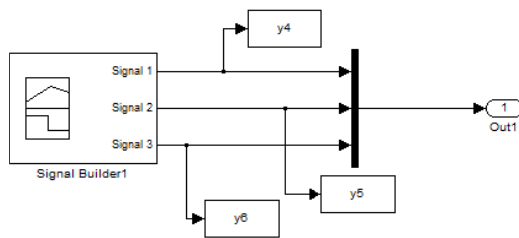
$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-3:} \\ \text{If } x_1 = M_3 \text{ (sekitar } 97,2 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_3 x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-4:} \\ \text{If } x_1 = M_4 \text{ (sekitar } 108 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_4 x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-5:} \\ \text{If } x_1 = M_5 \text{ (sekitar } 118,8 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_5 x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aturan kontroler ke-6:} \\ \text{If } x_1 = M_6 \text{ (sekitar } 129,6 \text{ Kg/cm}^2\text{)} \\ \text{Then } u = -\mathbf{K}_6 x \end{aligned} \quad (19)$$

Fungsi keanggotaan yang dipilih adalah fungsi keanggotaan segitiga. M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 , dan M_6 adalah fungsi keanggotaan segitiga yaitu $\{a;b;c\} = \{64,8; 75,6; 86,4\}, \{75,6; 86,4; 97,2\}, \{86,4; 97,2; 108\}, \{97,2; 108; 118,8\}, \{108; 118,8; 129,6\}, \{118,8; 129,6; 140,4\}$. Dalam tugas akhir ini digunakan inferensi *fuzzy* dengan penghubung *AND* dan metode defuzifikasi yang digunakan adalah *center average*. Gambar 3 adalah fungsi keanggotaan M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 , dan M_6 .

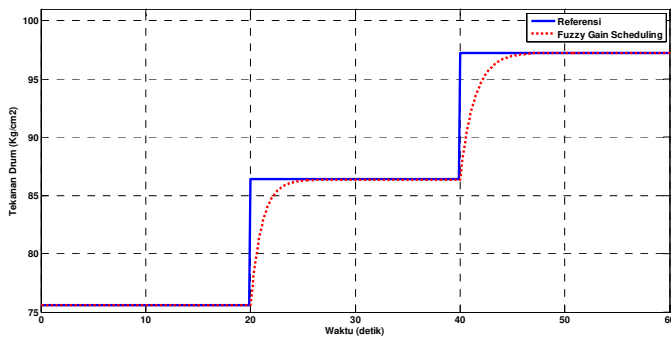
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , dan M_6 

Gambar 4. Diagram Simulink Blok Sinyal Referensi

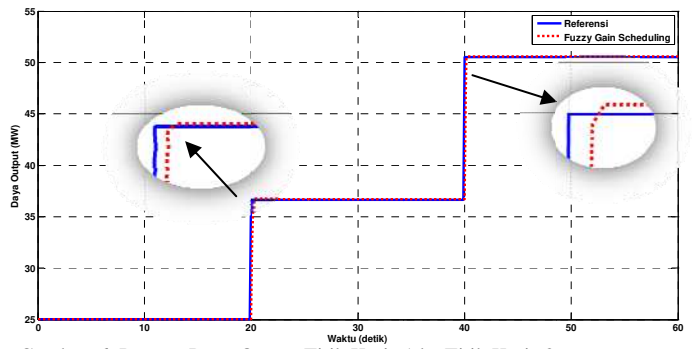
Untuk mendesain kontroler *fuzzy gain scheduling*, diperlukan sinyal referensi berupa sinyal step dan kontroler *fuzzy* Takagi-Sugeno. Sinyal referensi berisi beberapa titik kerja pada *boiler-turbine plant*. Untuk membuat sinyal referensi pada Simulink MATLAB digunakan *signal builder*. Gambar 4 merupakan isi blok sinyal referensi yang dibuat pada tugas akhir ini.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

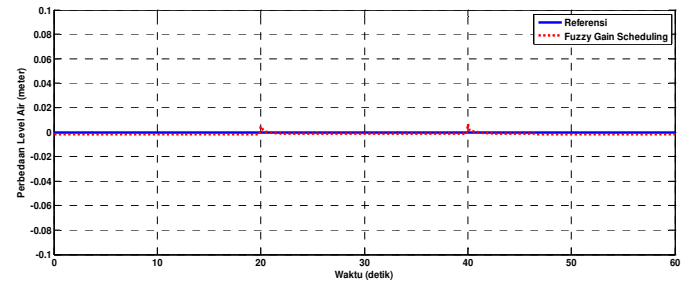
Simulasi kontrol *fuzzy gain scheduling* pada *boiler-turbine plant* dikatakan baik apabila respon tekanan drum dan daya output mampu mengikuti sinyal referensi yang diberikan serta respon perbedaan level air pada drum mampu dijaga tetap konstan pada posisi 0 meter.



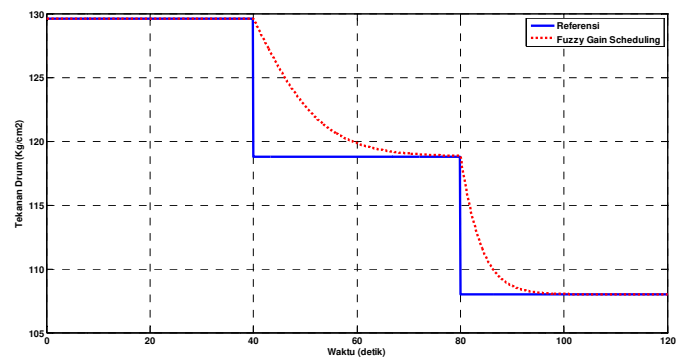
Gambar 5. Respon Tekanan Drum Titik Kerja 1 ke Titik Kerja 3



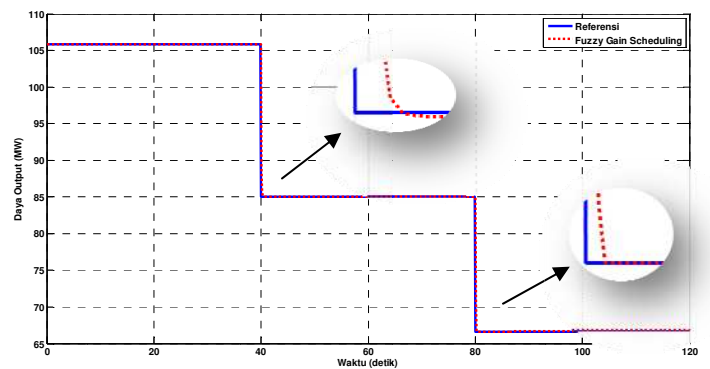
Gambar 6. Respon Daya Output Titik Kerja 1 ke Titik Kerja 3



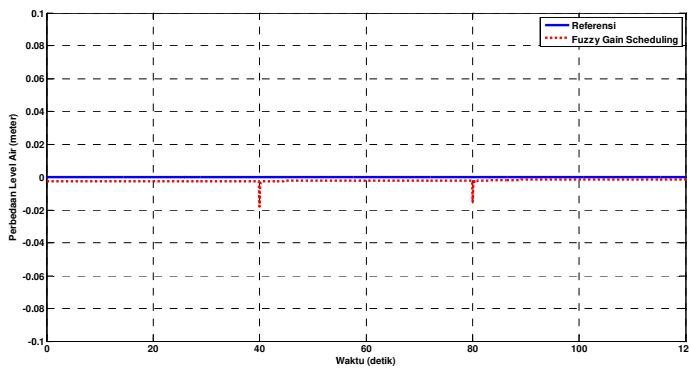
Gambar 7. Perbedaan Level Air Titik Kerja 1 ke Titik Kerja 3



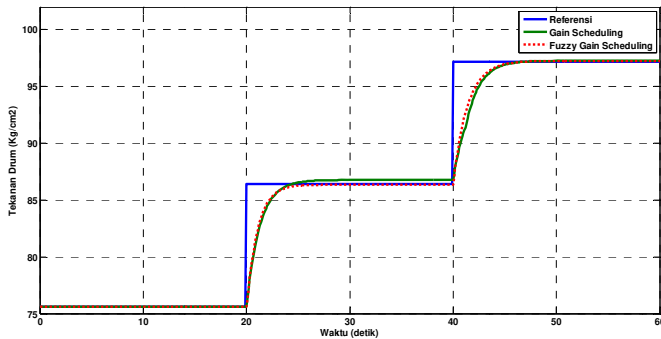
Gambar 8. Respon Tekanan Drum Titik Kerja 6 ke Titik Kerja 4



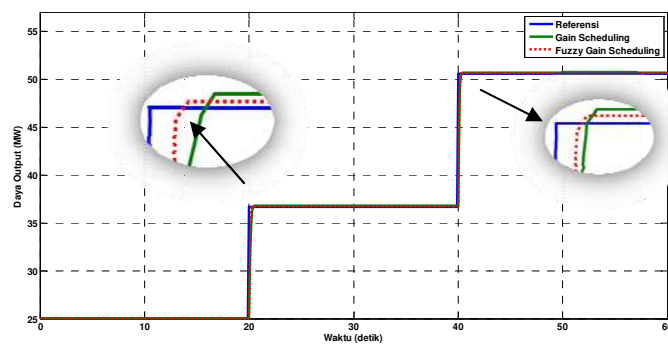
Gambar 9. Respon Daya Output Titik Kerja 6 ke Titik Kerja 4



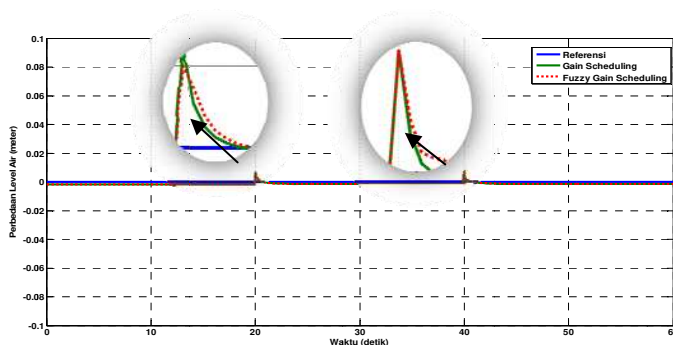
Gambar. 10. Perbedaan Level Air Titik Kerja 6 ke Titik Kerja 4



Gambar. 11. Respon Tekanan Drum Gain Scheduling dengan Fuzzy Gain Scheduling



Gambar. 12. Respon Daya Output Gain Scheduling dengan Fuzzy Gain Scheduling



Gambar. 13. Respon Perbedaan Level Gain Scheduling dengan Fuzzy Gain Scheduling

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dari simulasi pada *boiler-turbine plant*, maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Dengan kontroler *fuzzy gain scheduling* respon tekanan drum dan daya output mampu mengikuti sinyal referensi yang diberikan.
2. Hasil respon *transient* dengan kontroler *fuzzy gain scheduling* lebih baik dibandingkan dengan kontroler *gain scheduling*.

Untuk pengembangan berikutnya, dapat menambahkan metode optimal sehingga dapat mengoptimalkan performansi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Garduno-Ramirez, R. and Lee, K.Y., "Wide Range Operation of a Power Unit Via Feedforward Fuzzy Control Thermal Power Plant". IEEE Trans. On Energy Conversion, pp. 421-426, 2000.
- [2] Tan, W., Horacio, J.M., Chen, T., and Liu, J., "Analysis and Control of a Nonlinear Boiler-Turbine Unit", Journal of Process Control 15, pp. 883-891, 2005.
- [3] Bell, R.D. and Åström, K.J., "Dynamic Models for Boiler-Turbine-Alternator Units: Data Logs and Parameter Estimation for a 160 MW Unit". Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [4] Tanaka, K., Wang, Hua O., "Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons, Inc., Ch.2, 2001.c
- [5] Korba, P., Babuska, R., Verbruggen, H. B., Frank, P. M., "Fuzzy Gain Scheduling: Controller and Observer Design Based on Lyapunov Method and Convex Optimization". IEEE Trans. on Fuzzy Systems, pp. 285-298, 2003.